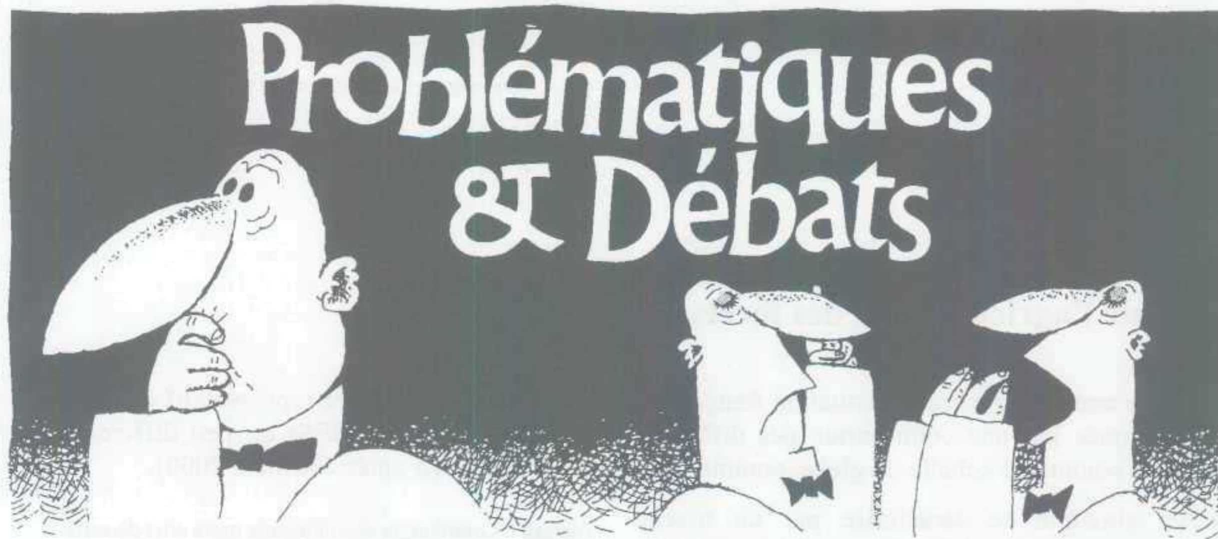


la recherche agronomique face aux gaz à effet de serre

par Bernard Seguin

INRA, unité Agroclim, site Agroparc, domaine Saint-Paul, 84914 Avignon cedex 9
seguin @avignon.inra.fr

Dans le contexte international lié à l'émission des gaz à effet de serre (GES), l'Union européenne (UE) se situe dans une position de départ intermédiaire entre les pays hautement industrialisés et les pays en développement. En effet, pour un produit intérieur brut (PIB) sensiblement voisin, de l'ordre de 20 000 $ par habitant, le niveau moyen se situe à environ 12 tonnes de gaz carbonique (CO_2) émis par habitant, contre 23 pour les États-Unis et 21 pour le Canada. Dans les négociations liées au protocole de Kyoto, l'UE s'est engagée à une réduction de l'ordre de 8% de ces émissions pour la période 2008-2012.

Au sein de l'UE, la France se trouve elle-même en position moyenne, avec une émission de l'ordre de 6 t de CO_2 par habitant, pour un PIB d'environ 15 000 € par habitant. Elle peut donc être considérée, en plus de son importance en termes de superficie et de population, comme assez représentative, avec une situation intermédiaire entre les pays du nord (Allemagne, Pays-Bas, Belgique) et ceux du sud (Espagne, Grèce, Portugal). Dans le cadre des engagements de Kyoto, les accords internes à l'UE l'engagent à simplement stabiliser les émissions au niveau de 1990. Pour les six gaz retenus au protocole, l'émission s'élevait, en 1990, à 144 millions de tonnes d'équivalent carbone et, sans mise en œuvre de mesures spécifiques, ces émissions atteindraient, en 2010, un niveau de 175 millions de tonnes de carbone : il faudra donc un effort certain pour atteindre l'objectif fixé ; ce qui a amené la mise en place d'un programme national en 1999. À noter que la lutte contre le changement climatique a été officiellement déclarée priorité nationale et qu'elle s'appuie sur une structure de coordination mise en place depuis 1992, la Mission interministérielle pour l'effet de serre (MIES). Il est également envisagé actuellement de créer un observatoire du changement climatique.

Texte adapté de la communication présentée par l'auteur au LXV[e] Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec, à Québec (Canada), le 7 juin 2002, et repris avec l'aimable autorisation de l'Ordre.
Titre originel : « Vision européenne sur les changements climatiques et sur la production et la réduction de gaz à effet de serre en regard de l'agriculture, à partir de l'exemple de la recherche agronomique en France ».

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

Part de l'agriculture et des forêts

Dans ce contexte général, la situation française (et ceci est également assez représentatif de l'Europe) est marquée par une contribution des différents gaz à effet de serre (GES) un peu différente des chiffres connus à l'échelle du globe, comme l'indique le tableau I (d'après Germon, 2000).

Cette situation se caractérise par un niveau d'émission plus élevé en CO_2, mais ceci est peut-être attribuable à une comptabilité différente des composés fluorocarbonés (CFC) et, surtout, à une inversion de l'ordre des deux autres GES principaux, l'oxyde nitreux ou peroxyde d'azote (N_2O) qui vient en seconde position, assez nettement, alors que l'importance du méthane (CH_4) est moindre. Et ceci est attribuable, en grande partie, à l'importance du secteur agriculture et forêts.

Tableau I. Contribution des différents gaz à effet de serre :
1. au forçage radiatif de l'échelle du globe (IPCC, 1996) ;
2. au potentiel de réchauffement global en France métropolitaine en 1998 (CITEPA, 1999).

	1	2
CO_2	63,7%	64,9%
N_2O	5,7%	17,7%
CH_4	19,2%	11,3%
CFC, HFC et dérivés	11,1%	-
HFC, PFC, SF	-	1,6%

L'agriculture contribue à elle seule pour 18% à l'ensemble des émissions de GES au niveau français, alors qu'elle représente moins de 3% du PIB (le secteur forestier seulement se traduisant par des émissions nettes comprises entre 0 et 1 million de tonnes de carbone par an, suivant les modalités de comptabilisation du changement d'occupation des terres). Dans le cadre de ce secteur agriculture et forêts, c'est le N_2O qui occupe la part prépondérante, avec 56% des émissions, contre 33% pour le CH_4, et 11% pour le CO_2(mais les récentes évolutions dans les modalités d'application du protocole de Kyoto redonnent une importance particulière à ce poste, compte tenu, bien sûr, des possibilités de stockage de carbone). Voir la figure 1 (d'après les chiffres du Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique - CITEPA, 1997).

Une dernière information pour compléter cette présentation du contexte (à partir des données publiées par le SCEES, 1998) : si le poids économique de l'agriculture est devenu faible, celle-ci reste dominante au niveau de l'utilisation du territoire. Sur 55 millions d'hectares, elle en occupe encore 33 (soit environ 60%), dont 3 (5,4%) ne sont pas cultivés. Les bois et les forêts représentent l'équivalent

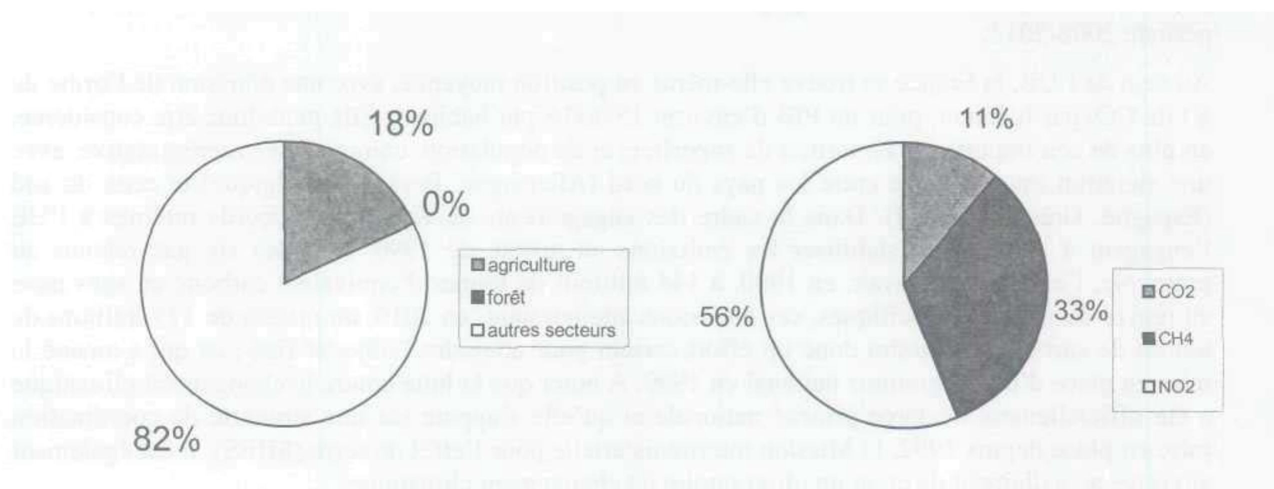


Figure 1. Part relative du secteur agriculture et forêts dans les émissions de gaz à effet de serre (à gauche) **et part relative des différents gaz pour les émissions du secteur agriculture et forêts** (à droite)

de 15 millions d'hectares (27,5%) et le territoire non agricole environ 7 seulement (12,6%). La composante agricole diminue régulièrement (de 130 000 ha en moyenne chaque année) et cette libération de terres bénéficie, pour partie, aux surfaces boisées (80 000 ha chaque année), ce qui permet d'enregistrer, pour le chapitre « changement d'utilisation des sols et forêts » une absorption nette équivalente à 10% des émissions des autres secteurs.

Sur les 54,5% de surface agricole utile (SAU) correspondant à 30 millions d'hectares, les terres arables en occupent plus de la moitié (18 millions d'hectares, soit 61%). Cette proportion augmente régulièrement au détriment des surfaces toujours en herbe, qui occupent encore un peu plus de 10 millions d'hectares (soit 35% de la SAU), ce qui est en diminution notable par rapport aux 13 millions d'hectares en 1960 ! Quant aux cultures permanentes (vignes, vergers), elles ont fortement diminué et n'occupent maintenant qu'un peu plus d'un million d'hectare (soit moins que 4% de la SAU).

En résumé donc, un secteur agriculture et forêts qui ne pèse plus que 3% du PIB, mais occupe encore 87% de la surface du territoire national et contribue, par le biais de la seule agriculture, à l'émission de 18% des GES sur près de 60% de la surface. Compte tenu des récents accords de Marrakech et des perspectives de décompte des « puits », cette importance de la surface occupée redonne à ce secteur un poids significatif dans le contexte de l'effet de serre et du changement climatique. Quels impacts prévisibles, quelles solutions pour limiter les émissions et augmenter les capacités de séquestration ? Ce sont les questions que va aborder cet exposé, à partir des travaux de la recherche agronomique française à l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) sur le sujet ces dernières années.

Travaux de recherche à l'INRA sur l'effet de serre et le changement climatique

Si les travaux de recherche poursuivis dans les années 1980, tant dans le cadre du département de Bioclimatologie (en particulier à Avignon et Grignon sur l'impact des modifications du microclimat ou du climat local) que dans celui des départements d'Agronomie (Clermont-Ferrand et Laon) ou de Science du sol (Avignon, Dijon, Grignon, Orléans, etc.) sur les cycles du carbone et de l'azote, permettaient de disposer du potentiel scientifique et technique nécessaires, ce n'est que vers le début des années 1990 qu'il a été décidé d'organiser une mobilisation de chercheurs et laboratoires sur ce thème. Cette mobilisation s'est appuyée sur une incitation (soutenue par des crédits affectés), dans le cadre du programme Agrotech (voir le compte rendu dans INRA, 1995). Elle a permis de rassembler une communauté d'une vingtaine de chercheurs sur les deux volets complémentaires suivants :

- évaluation des impacts d'un doublement du CO_2 et d'un réchauffement climatique sur la production agricole et forestière ;
- quantification des échanges des surfaces agricoles et forestières pour les GES et appréciation de l'efficacité des pratiques pour réduire les émissions ou augmenter les absorptions.

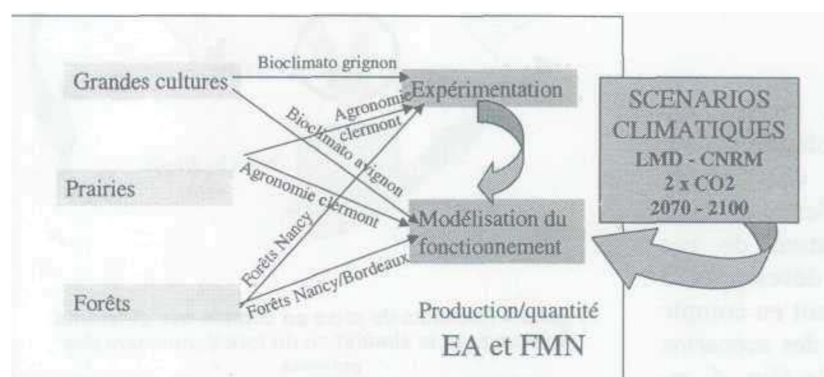


Figure 2. Organisation des travaux sur l'impact du changement climatique
LMD : Laboratoire de météorologie dynamique du CVNRS ; CNRM : Centre national de recherches météorologiques.
EA : département Environnement et Agronomie (INRA) ; FMN : département Forêts et Milieux naturels (INRA).

Ces deux volets complémentaires ont été poursuivis simultanément et leur philo-

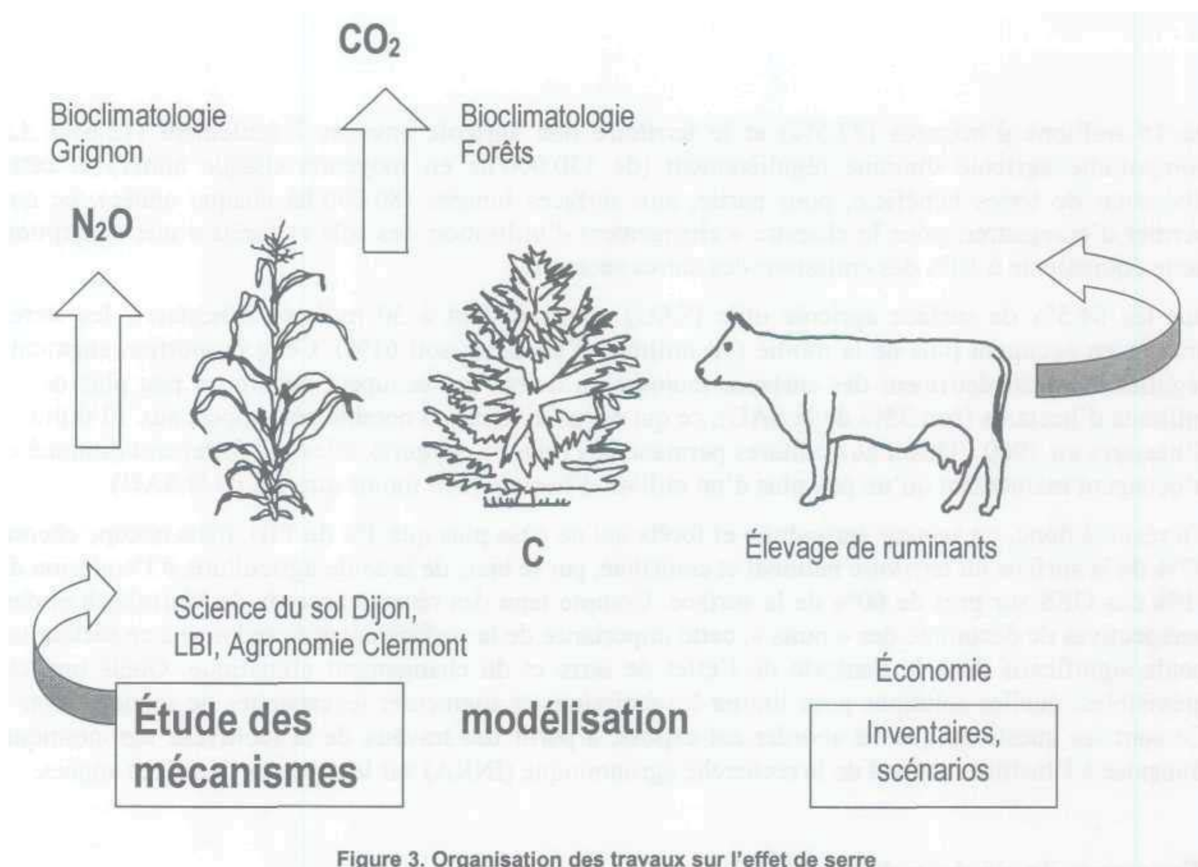


Figure 3. Organisation des travaux sur l'effet de serre

sophie générale est représentée dans les deux schémas ci-dessus (fîg. 2 et 3), sachant que nous ne traiterons pas ici de la production forestière en nous limitant au seul aspect de l'agriculture.

Impacts du changement climatique sur la production agricole

Les travaux dans ce domaine effectués au cours de la dernière décennie ont logiquement porté, en premier lieu, sur les productions qui occupent une part prépondérante de la superficie agricole : les grandes cultures et les prairies et fourrages.

Grandes cultures

Pour les grandes cultures, les travaux ont combiné des études écophysiologiques sur l'influence du doublement du CO_2 sur le fonctionnement des cultures et des analyses à partir des modèles de simulation de ces cultures, CÉRES puis STICS, développés à l'INRA (Brisson, 1998), en prenant en compte simultanément l'effet du CO_2 et des scénarios climatiques pour la fin du siècle (fig. 4, ci-dessus).

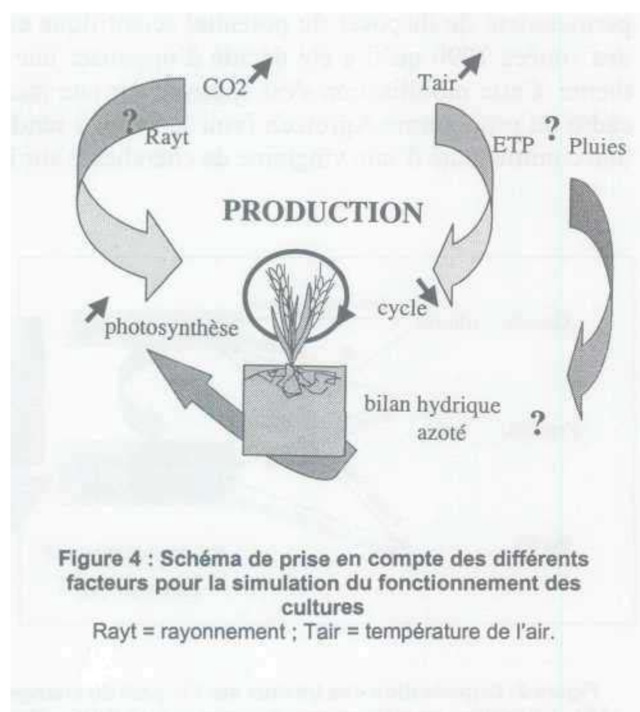


Figure 4 : Schéma de prise en compte des différents facteurs pour la simulation du fonctionnement des cultures
Rayt = rayonnement ; Tair = température de l'air.

Appliqués essentiellement au blé et au maïs, ces travaux ont permis d'obtenir des ordres de grandeur des effets attendus sur le rendement de ces cultures pour des situations climatiques variées (Delécolle *et al.*, 1995), dont l'essentiel est présenté dans le tableau II, ci-dessous (repris d'après Delécolle et *al.*, 1999).

Tableau II. Impacts simulés pour différentes espèces et conditions

Culture	Lieu	Rendement	Consommation en eau
1 – Blé	Versailles (sans irrigation)	+5,7	- 1,7
	Avignon (irrigué)	+2,5	- 5,7
- Maïs	Versailles (sans irrigation)	+10,6	- 12,4
	Avignon (irrigué)	-16,1	- 16,2
2 - Blé	Toulouse (irrigué)	+4,0	- 5,8
	Versailles (irrigué)	+2,9	0

Variations simulées des rendements et des consommations en eau de cultures de blé et de maïs en différents lieux (exprimées en pourcentages des valeurs simulées en conditions actuelles).
Résultats 1 : scénario climatique GISS transitoire, année 2030, CO_2 460 ppm, modèles CÉRES, moyenne sur 30 ans simulés.
Résultats 2 : scénario ARPÈGE Climat, anomalies de températures sur sept ans, modèles STICS, effet CO_2 non pris en compte, moyenne sur 16 années simulées.
Sources : Delécolle (données non publiées).

Ces résultats font apparaître des effets se situant dans une fourchette allant de +10% à-15%, environ, résultant du poids relatif d'un effet positif de la fertilisation carbonée (fig. 5) et de l'effet négatif du raccourcissement du cycle végétatif attribuable au réchauffement prévu. À noter également, dans tous les cas, une diminution attendue de la consommation en eau, conséquence de la réduction de conductance stomatique.

Ces résultats permettent d'avoir un ordre de grandeur des effets prévisibles sur les grandes cultures. Ils n'ont pas été repris, pour le moment, pour d'autres cultures importantes telles que le tournesol, le colza, la betterave à sucre, comme cela serait possible techniquement. Et ceci pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il n'est pas totalement certain que les modèles, dans l'état actuel des choses, reproduisent totalement les interactions entre la fertilisation azotée et le fonctionnement des cultures, en particulier sous l'angle de la contrainte hydrique. Ensuite, ils n'incorporent pas les effets des autres contraintes biotiques (adventices, maladies, insectes) à prendre en compte dans les systèmes de culture. Par ailleurs, les scénarios climatiques mis en œuvre étaient encore assez imparfaits, d'une part, pour la pluviométrie et donc la contrainte hydrique, d'autre part, en termes de résolution spatiale, avec une maille élémentaire de 200 km. Les progrès récents des modélisateurs du climat sur ces deux points amènent à envisager maintenant une reprise de ces travaux et un affinement des

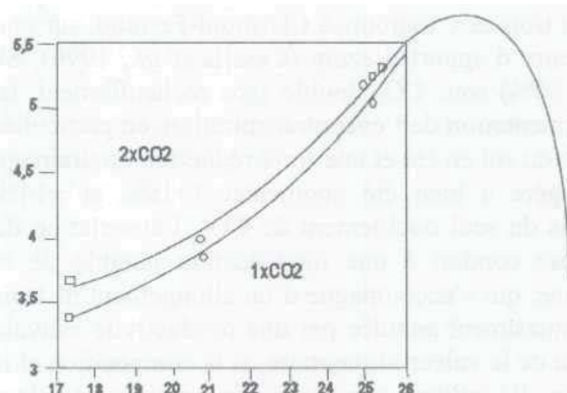


Figure 5. Effet de la concentration en CO_2 sur l'efficience de conversion du maïs
(adaptée d'après les résultats de Ruget *et al.*, 1996).
En ordonnée : efficience de conversion, en g de matière sèche ; en abscisse : température en °C.

prévisions, qui pourraient être étendues aux autres cultures annuelles. Plus qu'une information précise sur les perspectives de rendement à la fin du siècle, ces travaux devraient permettre d'indiquer des pistes pour les orientations génétiques à mettre en œuvre, et commencer à raisonner sur des systèmes de culture adaptés à ces nouvelles conditions. Globalement cependant, les résultats cités plus haut incitent à penser que le changement climatique ne devrait pas poser de problème insurmontable pour les grandes cultures, dont les capacités d'adaptation rapide (quelques années) ont été démontrées dans le passé, à la suite des modifications successives d'orientation de la Politique agricole commune (PAC) au niveau de l'UE. C'est peut-être le facteur « eau » qui posera le plus de problèmes, si les tendances qui se dessinent dans les scénarios actuels (Déqué, 2000) vers une diminution de pluviométrie au cours des saisons déjà sèches se confirment.

Prairies

L'autre production qui a fait l'objet d'études approfondies est la production prairiale, qui reste importante même si elle diminue régulièrement, comme nous l'avons noté plus haut (l'addition des 10,5 millions d'hectares toujours en herbe et des 2,7 millions d'hectares de prairies temporaires ou artificielles conduit à un total de l'ordre de 13 millions d'hectares,soit le même ordre de grandeur que les grandes cultures que nous venons d'évoquer).

Là aussi, les travaux menés à Clermont-Ferrand, sous la responsabilité de J.-F. Soussana, ont associé des études écophysiologiques en conditions contrôlées à des simulations basées sur des scénarios « fin de siècle ».

Les premières ont permis d'évaluer, dans des conditions d'enrichissement à l'air libre (mini-FACE), la dynamique de la végétation en prairie permanente soumise à un enrichissement en CO_2 de 70% (600 ppm) (Teyssonneyre *et al*, 2002) : la composition botanique est modifiée significativement et, si les graminées demeurent dominantes dans tous les cas, l'équilibre entre espèces se déplace en faveur des légumineuses fixatrices d'azote lorsque la prairie est bien exploitée, ou des dicotylédones non fixatrices lorsqu'elle l'est peu. Ces changements dans la structure des communautés prairiales ont eu des conséquences à la fois pour la biodiversité et la valeur pastorale. La baisse de biodiversité observée habituellement en cas de coupes peu fréquentes a été évitée sous forte concentration en CO_2, et la valeur pastorale augmentée, en cas de fort rythme de coupes. Toujours dans ce cas, la production annuelle de biomasse aérienne a été significativement accrue (+30% en deux ans), avec un accroissement plus faible (+11%) dans les prairies coupées plus fréquemment.

Pour évaluer l'effet simultané d'un scénario avec doublement du CO_2et d'un réchauffement de +3°C, une expérimentation a été conduite sous serre pendant trois ans, toujours à Clermont-Ferrand, sur une prairie temporaire de ray-grass cultivée à deux niveaux d'apport d'azote (Casella *et al*, 1996). Si l'efficience de l'eau a bien été augmentée (de 17 à 30%) sous CO_2 doublé sans réchauffement, la combinaison des deux effets a conduit à une nette augmentation de l'évapotranspiration, en particulier au printemps, avec un dessèchement accru et prolongé du sol en été et une forte réduction du drainage en hiver. En conséquence, si la production fourragère a bien été augmentée (+19% et +14% respectivement, suivant le niveau d'azote) dans le cas du seul doublement de CO_2, l'association de celui-ci et du réchauffement simulé de 3°C n'a pas conduit à une modification notable de la production : l'augmentation au printemps et en automne, qui s'accompagne d'un allongement de trois semaines de la période de croissance végétative, est quasiment annulée par une productivité estivale plus faible sous le climat estival plus chaud. Au niveau de la valeur alimentaire, si la composition et la digestibilité des parois végétales ont été peu modifiées, l'équilibre entre valeur énergétique et valeur azotée du fourrage a été modifié par l'augmentation des sucres solubles et la diminution des matières azotées totales (Casella et Soussana, 1997).

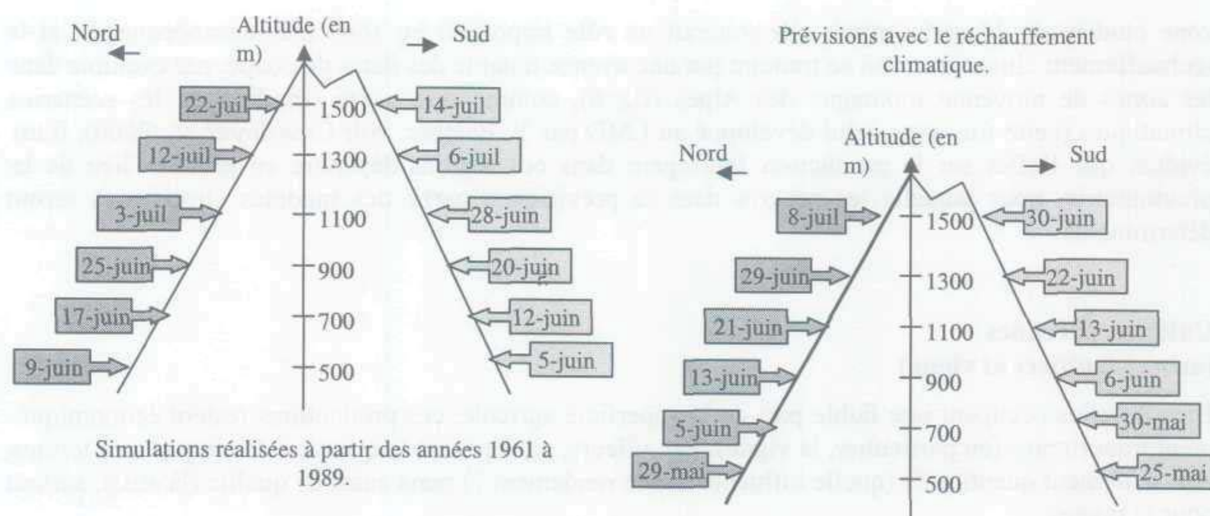


Figure 6. Effets du réchauffement climatique sur la première date de coupe en moyenne montagne alpine (juin 2001)

Ces travaux écophysiologiques ont permis d'obtenir des éléments d'information précis, qui sont complétés par les travaux de simulation basés sur des scénarios climatiques issus du modèle ARPÈGE développé par Météo-France (Déqué, 2000) avec une maille de 80 km, et appliqués sur trois sites du Massif central, en utilisant le modèle de simulation d'écosystème prairial PASIM. Les principaux résultats sont les suivants (Soussana *et al.*, 2001) : en moyenne annuelle, pour ces régions à pluviométrie élevée (de 1 080 à 1 300 mm), l'effet serait largement positif dans le cas d'une gestion par fauche, avec une augmentation de photosynthèse, de production de biomasse aérienne et de protéines s'élevant respectivement à 37%, 25% et 11% (dont 25%, 18% et 5% seraient attribuables, d'après le modèle, au seul doublement de CO_2, ce qui est en accord avec les résultats expérimentaux mentionnés précédemment). Cet effet positif serait assez indépendant des modes de gestion, puisque les différentes combinaisons de fréquence de fauche, de fertilisation azotée et de modes de pâturage testées sur un site (Allier) ne font varier le gain de production que de 18 à 25%. Dans le cas d'un pâturage, les effets positifs apparaissent moindres (7% au maximum dans le cas d'un fort chargement) du fait des contraintes liées au pâturage.

Pour aller vers une vision encore plus complète au niveau des systèmes d'élevage, cette étude a été poursuivie en étudiant les conditions d'adaptation à ces nouvelles conditions : si l'exploitation dans son.mode actuel induisait une augmentation du foin récolté (de 9 à 34% suivant les modes de gestion), elle n'aurait qu'une faible influence sur la production animale. En revanche, l'augmentation du chargement animal de 20% ou l'extension de la saison de pâturage de trois semaines permettrait chacune d'accroître l'ingestion et la production de viande dans des proportions allant de 7 à 20% pour la première et de 2 à 20% également pour la seconde.

Comme dans le cas des grandes cultures à l'heure actuelle, il semble difficile d'aller plus loin dans l'état actuel des choses, d'une part, en raison des incertitudes sur les scénarios climatiques, en particulier pour ce qui concerne la pluviométrie, et, d'autre part, à cause des limites encore rencontrées par le modèle de prairie, tant sur la description du fonctionnement (pas de modulation intra-annuelle de la production et donc de prise en compte d'épisodes de sécheresse en été) que sur leurs modalités de gestion du pâturage (chargement constant tout au cours de la saison, résultats à l'échelle de la parcelle et non pas de l'exploitation). Par ailleurs, et comme pour les cultures annuelles, il reste une interrogation forte sur la contrainte hydrique. À ce propos, si celle-ci devait rester modérée pour la

zone étudiée du Massif central, elle jouerait un rôle important en zone méditerranéenne. Et si le réchauffement climatique doit se traduire par une avance notable des dates de coupe, par exemple dans les zones de moyenne montagne des Alpes (fig. 6), comme cela a été simulé avec les scénarios climatiques (cette fois avec celui développé au LMD par Y. Polcher, voir Crossley *et al.*, 2000), il est évident que l'effet sur la production fourragère dans ces régions dépendra en premier lieu de la pluviométrie, pour laquelle les progrès dans la prévision à partir des modèles climatiques seront déterminants.

Cultures pérennes
(arbres fruitiers et vigne)

Bien qu'elles occupent une faible part de la superficie agricole, ces productions restent économiquement importantes (en particulier, la vigne). Par ailleurs, elles posent la question des impacts en termes, non seulement quantitatifs (quelle influence sur le rendement ?) mais aussi de qualité (là aussi, surtout pour la vigne).

Les travaux de recherche sur ces productions ont commencé plus récemment. Contrairement aux cas précédents, elles n'ont pas donné lieu à des études écophysiologiques ou à la mise en œuvre de modèles de simulation, qui ne sont pas encore disponibles, même si une version de STICS-vigne est en cours d'élaboration et devrait pouvoir faire l'objet de travaux à base de scénarios climatiques.

Dans un premier temps, la démarche s'est focalisée sur la prise en compte de la phénologie, qui joue un rôle de premier plan sur ces productions et est directement en rapport avec la température de l'air, donc susceptible d'être affectée en premier lieu par le réchauffement climatique. Les premiers résultats obtenus font apparaître, de façon très nette, une avance significative des divers stades phénologiques, comme l'indiquent les figures suivantes pour les arbres fruitiers et sur la vigne (fig. 7 et 8), à titre d'exemples assez représentatifs cependant de l'ensemble des cas observés.

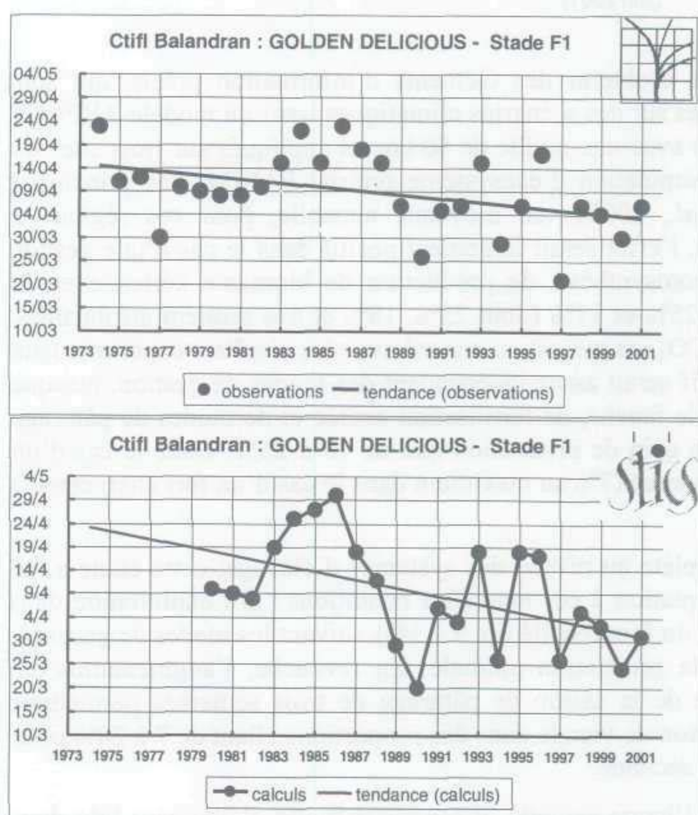


Figure 7. Évolution des dates de floraison du pommier dans le Sud-Est (Balandran) sur la période 1973-2000
En haut : dates observées ; en bas : dates simulées avec un modèle phénologique.

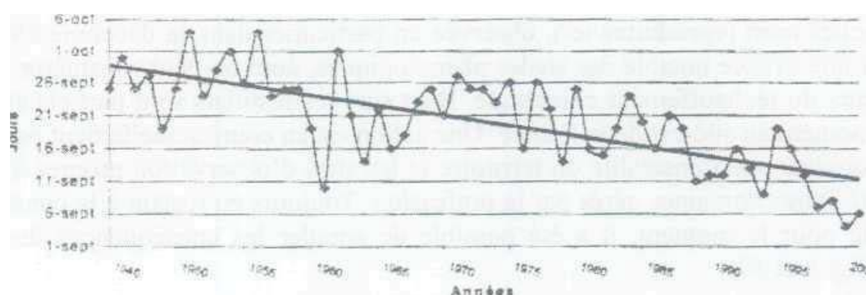


Figure 8. Évolution des dates du début des vendanges à Chateauneuf-du-Pape
(Ganichot, 2002)

Ces deux exemples indiquent, de manière assez spectaculaire mais systématique, une évolution de la précocité phénologique aux différents stades (de l'ordre de deux semaines pour la floraison du pommier sur 30 ans à trois, voire quatre semaines sur la date de vendange dans les 50 dernières années). Ils sont encore préliminaires, car il faudrait faire la part, pour la date des vendanges, de ce qui est attribuable à l'évolution des techniques culturales et du climat. En tout état de cause, cette réserve ne porte pas sur la floraison du pommier, dont l'évolution observée est assez bien confirmée par un module phénologique classique (fig. 7, en bas).

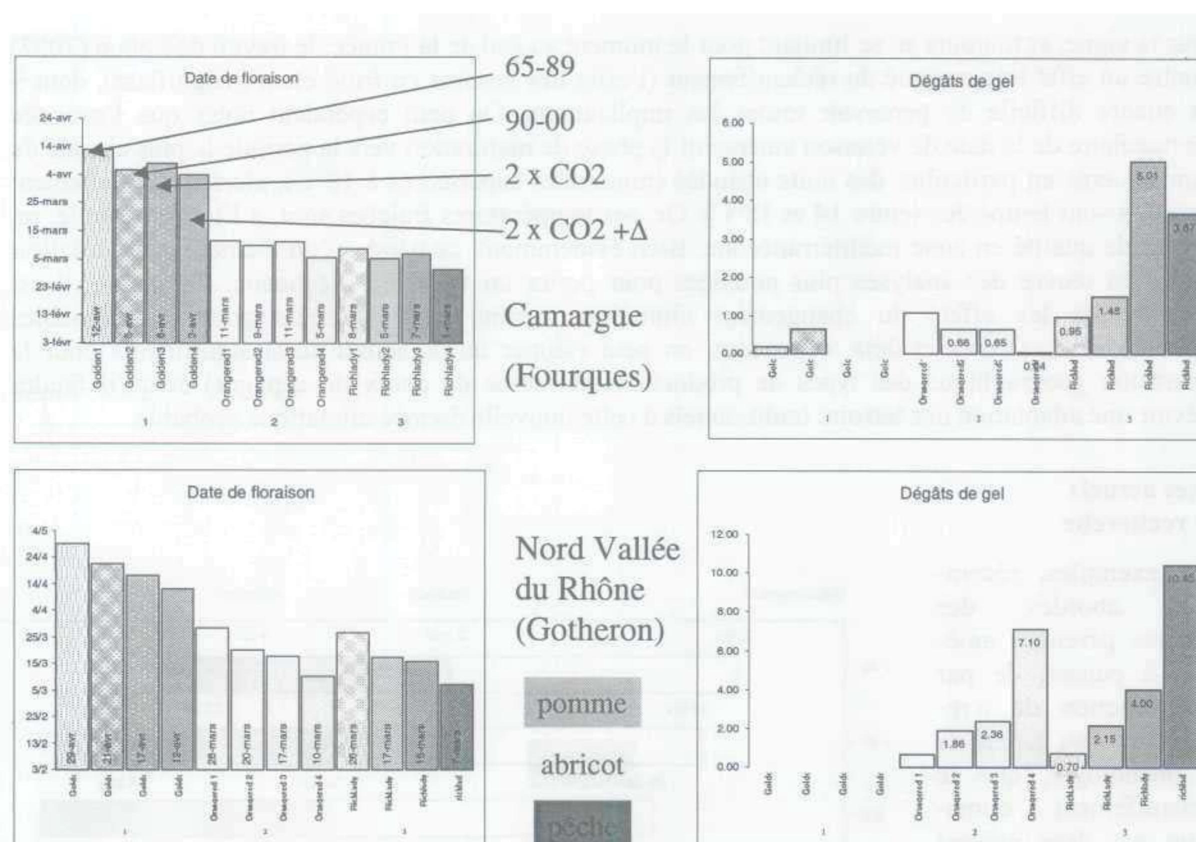


Figure 9. Estimations des dates de floraison de trois arbres fruitiers (pommier, abricotier et pêcher) pour deux sites (sud – Camargue - et nord de la vallée du Rhône), avec les données climatiques des séries 1965-1989, 1990-2000 et deux scénarios de réchauffement 2 x CO_2 classique et 2 x CO_2 avec variabilité
(Domergue, 2001)

II ne paraît donc pas exagéré de prétendre que l'élévation de température, d'ailleurs confirmée par les données climatiques (non reproduites ici), observée en particulier dans la décennie 1990-2000, s'est déjà traduite par une avance notable des stades phénologiques, dont on peut considérer qu'ils agissent comme révélateurs du réchauffement climatique. Bien sûr, ces résultats sont partiels et en particulier limités pour le moment au sud-est de la France. Une action est en cours actuellement pour collecter les données phénologiques sur l'ensemble du territoire et les sites d'observation propres à l'INRA, mais aussi dans les différents domaines gérés par la profession. Toujours en restant à la considération de la seule phénologie pour le moment, il a été possible de simuler les conséquences des scénarios de réchauffement (fïg. 9 et 10).

Au travers de ces exemples, on voit que la date de floraison des différentes espèces est finalement peu avancée dans le site le plus au sud (par le jeu antagoniste des besoins en froid, puis en chaleur), alors qu'elle est plus sensible au réchauffement au nord. Par ailleurs, contrairement à ce qui peut être attendu du seul point de vue climatique par le relèvement des températures nocturnes, les dégâts de gel apparaissent notablement accrus dans un certain nombre de cas, à cause de l'avancée de la date de floraison. Au-delà de ces résultats, encore une fois préliminaires et qui demandent à être confirmés, il faut retenir que l'effet du réchauffement climatique, vraisemblablement perceptible déjà sur les 10 dernières années, mettra en jeu des mécanismes complexes (succession des besoins en froid, puis en chaleur) qui devront être pris en compte dans la sélection variétale et pourraient remettre en cause l'étalement géographique des zones de production. Par ailleurs, le risque de gel ne disparaîtra pas, au contraire, mais, pour aller plus loin sur ce problème, il faudra que les modèles climatiques soient plus performants que maintenant sur les valeurs-seuil, alors qu'ils ont surtout traité jusqu'à présent les valeurs moyennes.

Pour la vigne, et toujours en se limitant pour le moment au sud de la France, le travail de Lebon (2002) montre un effet très marqué du réchauffement (l'effet des besoins en froid étant insignifiant), dont il est encore difficile de percevoir toutes les implications. On peut cependant noter que l'avancée spectaculaire de la date de véraison amènerait la phase de maturation vers la période la plus chaude de l'année, avec en particulier des nuits chaudes (minimales supérieures à 18°C), alors qu'actuellement ces nuits sont tempérées (entre 14 et 18°C). Or, ces températures fraîches sont, à l'heure actuelle, un facteur de qualité en zone méditerranéenne. Bien évidemment, ce n'est qu'un élément et il va falloir mettre en œuvre des analyses plus poussées pour porter un véritable diagnostic. De même, il est évident que les effets du changement climatique seront très différents pour les vignobles septentrionaux. D'ores et déjà, cependant, on peut estimer qu'ils seront aussi significatifs pour la répartition géographique des types de production (et même de choix de cépages) et qu'il faudra prévoir une adaptation des terroirs traditionnels à cette nouvelle donnée climatique probable.

Axes actuels de recherche

Ces exemples, récemment abordés, des cultures pérennes amènent à penser, de par leur fonction de « révélateurs » au niveau de la phénologie, que le réchauffement climatique est déjà présent ou, qu'à tout le moins, le climat de la dernière décennie a présenté des

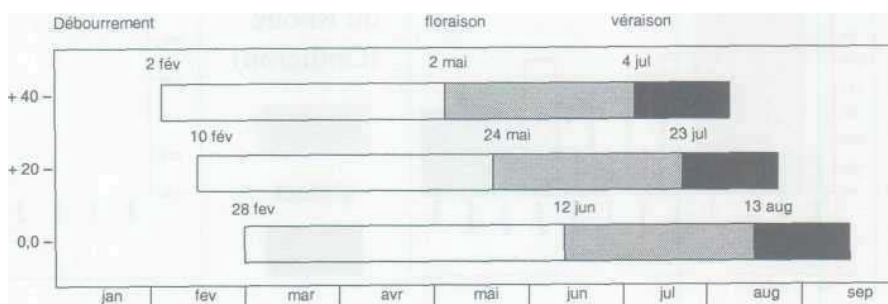


Figure 10. Projection de l'évolution de la phénologie de la vigne (cépage Syrah) dans la région de Montpellier
(Lebon, 2002)

particularités qu'il faut se préparer à voir persister, au minimum. Au-delà des travaux passés sur les scénarios « fin de siècle », cela conduit à formuler la priorité vers une analyse approfondie du passé récent et du présent, de façon à pouvoir apporter des éléments de réponse pour l'horizon 2020-2030 (et non plus seulement 2070-2100).

Par ailleurs, s'il est envisagé de ne pas délaisser totalement le cas des grandes cultures (au niveau de la sélection, en particulier, mais aussi des adventices et des ravageurs, peu abordés jusqu'à présent) et des prairies, on peut penser que leurs capacités d'adaptation rapide doit nous conduire maintenant à donner la priorité au niveau de la recherche aux cultures pérennes, dont le temps d'adaptation est plutôt de 10 à 20 ans.

Dans ce cadre en particulier (mais c'est valable, à un degré moindre pour les autres productions), il faudra pouvoir obtenir des modélisateurs du climat des scénarios avec un degré de confiance plus fort qu'actuellement sur les autres facteurs que la température (pluie mais aussi rayonnement global), une régionalisation plus poussée (maille de 50 km) et des indications plus complètes que la valeur moyenne (variabilité, valeurs-seuil).

Enfin, il faudra, pour l'ensemble des productions, se préoccuper de la qualité autant que de la quantité et, par ailleurs, intégrer les conséquences environnementales dans le champ des impacts à prendre en compte, tant il est vrai qu'à l'heure actuelle on ne peut plus traiter, dans le cadre de l'agriculture européenne, de production sans mettre au premier rang ces deux composantes. Il faut d'ailleurs noter que les conséquences environnementales des productions jouent elles-mêmes, par le biais du sol ou des échanges avec l'atmosphère, un rôle sur l'effet de serre, et qu'il faudra donc prendre en compte la rétroaction : changement climatique/effet de serre. Cette transition nous amène à envisager maintenant les travaux effectués sur l'effet de serre, comme annoncé.

Agriculture et bilan des gaz à effet de serre

Si les équipes de l'INRA disposaient déjà d'une bonne maîtrise, tant au plan de l'expérimentation qu'à celui de la modélisation, des échanges de CO_2 entre le sol ou un couvert végétal avec l'atmosphère d'un côté (bioclimatologie) et des mécanismes de dénitrification dans le sol, plutôt appliquée à l'époque au problème de rejet des nitrates dans les sols ou de l'évolution de la matière organique en physique des sols, il a fallu faire évoluer les programmes de façon assez significative vers le problème de la contribution de l'agriculture à l'effet de serre.

À partir du programme Agrotech, déjà présenté, c'est le programme AGRIGES qui a pris le relais de 1994 à 1998 pour stimuler et coordonner ces travaux (INRA, 1995 ; Académie d'agriculture, 1999). Cofinancé par plusieurs institutions, il a conduit à obtenir un certain nombre de résultats, qui sont présentés ci-dessous (les travaux portant sur les flux et le stockage du carbone dans les forêts n'étant pas traités ici).

Stockage du carbone dans les sols

Les travaux préalables d'Arrouays et Pélissier (1994) avaient permis d'obtenir une description assez précise de l'évolution des stocks de carbone sur une période d'une trentaine d'années dans le cas du passage d'une forêt à une culture (maïs) sur les limons du piedmont pyrénéen (fig. 11, ci-contre).

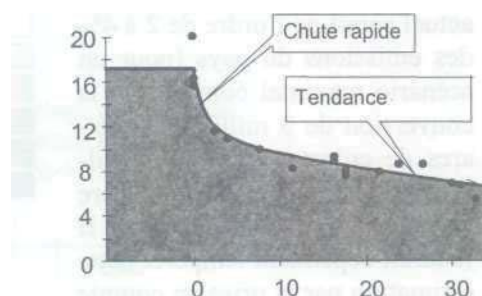


Figure 11. Évolution du stock de carbone dans le cas d'une transition forêt/culture
(Arrouays et Pélissier, 1994)
En ordonnée : carbone du sol, en kg.m^{-2} ; en abscisse : années après déforestation.

Dans le cadre du programme AGRIGES, il a surtout été essayé de passer à une échelle plus large (le territoire français), en calculant les stocks sur une profondeur de 0-30 cm. Pour cela, ont été croisées les caractéristiques de types de sol et d'occupation, à partir des estimations obtenues pour chacune de ces variables en utilisant les données contenues dans les diverses cartes pédologiques du territoire (fig. 12, ci-dessus).

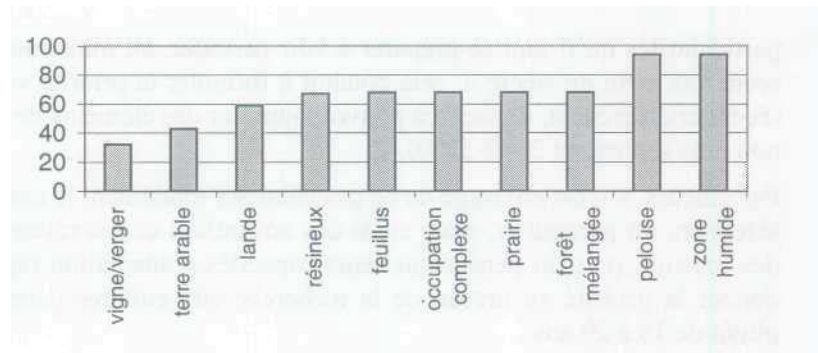


Figure 12. Stocks de carbone et occupations des sols
(Arrouays ef a/., 1999)

La carte obtenue (fig. 13, ci-dessous) permet à la fois d'apprécier la répartition géographique de ces stocks et de proposer une première estimation (3 milliards de tonnes de carbone à l'échelle du territoire français pour la couche 0-30 cm).

Par rapport aux évaluations mondiales (1 500 milliards de tonnes), le territoire métropolitain représenterait 1/500 des stocks mondiaux, mais il faut noter que ceux-ci sont estimés sur une profondeur de un mètre et que, sur cette base, on se rapprocherait plutôt d'une valeur de 1/400 à 1/300. Sous un autre angle, on peut mettre en rapport ce stock avec les émissions de carbone de la France, estimées à 100 millions de tonnes, soit environ 3% du stock.

Pour pouvoir apprécier l'évolution de ce stock en fonction de l'usage des sols, le travail d'Arrouays *et al.* (1999) a combiné les données historiques avec une estimation du stockage propre à chaque usage et un modèle de dynamique du carbone à deux compartiments. La figure 14 permet de résumer l'essentiel de l'évolution, en montrant un stockage continu depuis 1850 en raison de la diminution des surfaces cultivées. Malgré l'augmentation de celles-ci à partir de 1970 aux dépens des prairies, le bilan est resté positif car les prairies et forêts mises en place auparavant tendent vers la maturité et continuent à accumuler du carbone. La mise en place de la jachère nue imposée par la PAC vers 1990 a conduit à un stockage faible en fin de période, mais le potentiel de stockage actuel serait de l'ordre de 2 à 4% des émissions du pays (pour un scénario maximal comprenant la conversion de 3 millions d'hectares de cultures et des 0,8 millions d'hectare actuels de jachère en prairies et en forêts). Il faudrait cependant tempérer cette estimation par la prise en compte de l'augmentation de température, qui aurait pu se traduire par

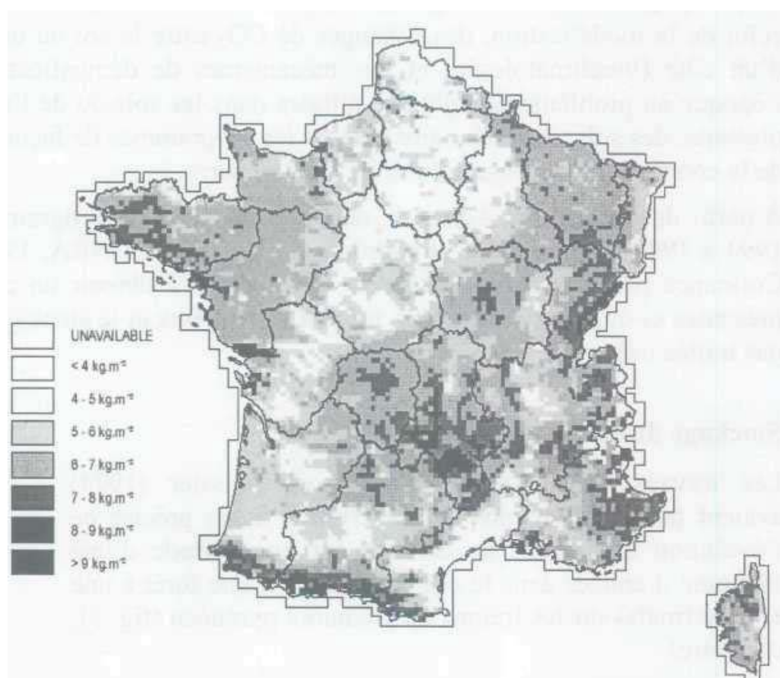


Figure 13. Distribution géographique du carbone organique dans les sols de France
(Arrouays *et al.*, 1999)
En blanc : données non disponibles..

un « déstockage » de 80 millions de tonnes depuis 1975, par le biais de l'effet sur la minéralisation des matières organiques tel qu'il est pris en compte dans le modèle, et serait susceptible, à lui seul, d'annihiler tout ou partie de ce stockage ! À noter également que l'étude n'a pas pris en compte l'évolution de la productivité des systèmes agricoles ou forestiers, faute de données suffisantes.

Il reste donc beaucoup à faire pour une évaluation précise de scénarios : le développement du modèle MORGANE (Arrouays *et al.*, 1999) devrait être un élément de base pour affiner les estimations actuelles, en complément des éléments disponibles, à une échelle plus fine, sur l'évaluation de l'effet des pratiques (fig. 15).

Il faut également noter que les recherches sur l'utilisation des cultures comme biocarburants peuvent également conduire à des possibilités de stockage du carbone, qui font l'objet d'évaluations en cours.

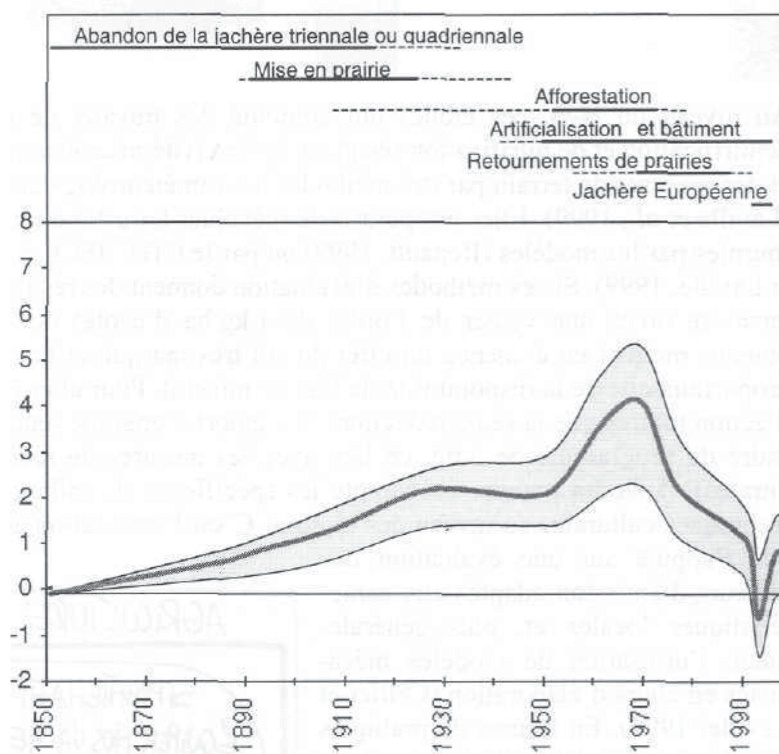


Figure 14. Estimation du stockage de carbone dans les sols français depuis 1850 En Mt.an^{-1},

avec les enveloppes correspondant aux hypothèses extrêmes de stock à l'équilibre sous forêts ou surfaces toujours en herbe (Arrouays *et al.*, 1999)

Émissions d'oxyde nitreux et de méthane

Ces deux gaz ont également fait l'objet d'études mobilisant plusieurs équipes de l'INRA, mais qui seront évoquées plus succinctement ici que le stockage du carbone, dans la mesure où celui-ci a pris une importance particulière depuis les récents accords de Marrakech et fait l'objet de réflexions sur des actions à mettre en œuvre à un niveau politique.

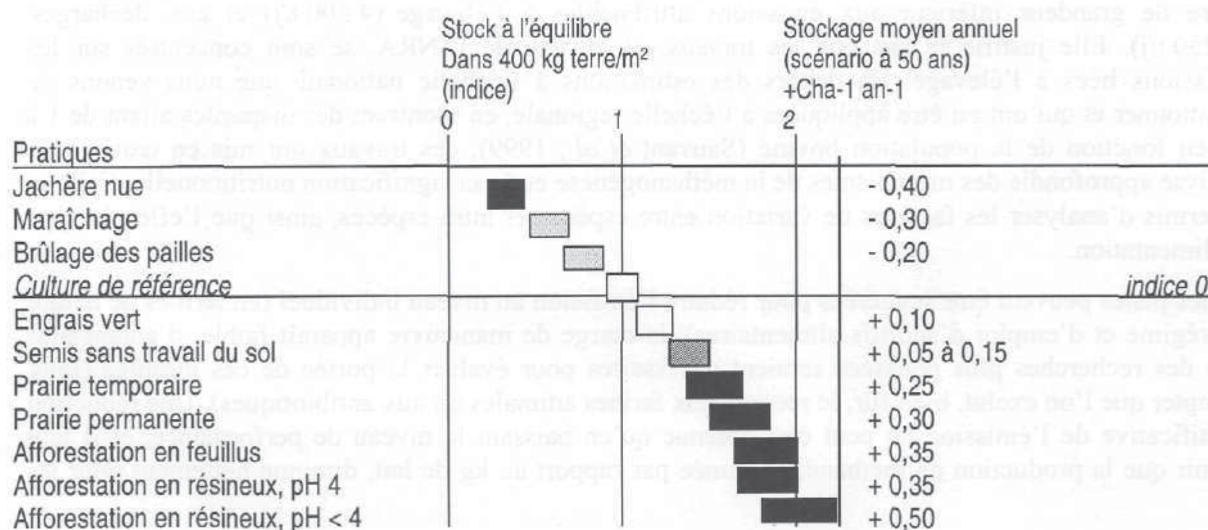


Figure 15. Évaluation du potentiel de stockage des différentes pratiques
(Balesdent, 1995).

Au niveau du N_2O, ces études ont combiné des travaux de modélisation fine des processus de dénitrifïcation et de nitrifïcation résultant de l'activité microbienne dans les sois (Germon *et al,* 1999) et des mesures de terrain par des méthodes micrométéorologiques ou de chambres d'échanges gazeux (Laville *et al,* 1999). Elles ont permis de réévaluer les estimations d'émission aux échelles régionales fournies par les modèles (Renault, 1999) ou par le GIEC/IPCC à partir de facteurs d'émission (Cellier et Laville, 1999). Si ces méthodes d'évaluation donnent des résultats globalement fiables à l'échelle du territoire (avec une valeur de l'ordre de 1 kg/ha d'azote) des apports de fertilisants, les résultats obtenus mettent en évidence un effet du sol très marqué et une influence qui pourrait être plus que proportionnelle de la disponibilité de l'azote minéral. Pour aller plus loin dans la définition de moyens d'action (autres que la seule réduction de l'apport d'engrais, seule mesure d'ailleurs envisagée dans le cadre du programme de lutte, en lien avec les mesures de réduction de pollution des eaux par les nitrates), il faudra prendre en compte les spécificités du milieu naturel (sol, climat) et l'impact des techniques culturales au niveau des régions. C'est l'orientation actuelle des travaux dans ce domaine, qui s'appuie sur une évaluation des facteurs d'émission adaptés aux caractéristiques locales et, plus généralement, l'utilisation de modèles mécanistes en cours d'élaboration (Cellier et Laville, 1999). En termes de pratiques agronomiques à l'échelle locale, il est cependant déjà possible, au-delà de la recommandation évidente d'ajustement strict des apports d'engrais aux besoins des cultures, d'attirer l'attention sur la limitation de la disponibilité d'azote minéral, d'une part, et le maintien d'un état structural favorable à l'aération, permettant de limiter les périodes d'anoxie et les émissions attribuables à la dénitrifïcation, d'autre part (Germon *étal,* 1999).



Pour le méthane, l'estimation grossière du bilan sur les sols en France, proposée par Roger *et al.* (1999), a montré que si les sols cultivés, et plus généralement les sols dans leur ensemble, constituent des puits (à hauteur respectivement de 274 et 236 t/jour), ceux-ci sont d'un ordre de grandeur inférieur aux émissions attribuables à l'élevage (4 500 t/j) et aux décharges (2 250 t/j). Elle justifie le fait que les travaux, au niveau de l'INRA, se sont concentrés sur les émissions liées à l'élevage. En dehors des estimations à l'échelle nationale que nous venons de mentionner et qui ont pu être appliquées à l'échelle régionale, en montrant des disparités allant de 1 à 60 en fonction de la population bovine (Sauvant *et al,* 1999), ces travaux ont mis en œuvre une analyse approfondie des mécanismes de la méthanogénèse et de sa signification nutritionnelle. Celle-ci a permis d'analyser les facteurs de variation entre espèces et intra-espèces, ainsi que l'effet du type d'alimentation.

Si des pistes peuvent être suggérées pour réduire l'émission au niveau individuel (en termes de nature du régime et d'emploi d'additifs alimentaires), la marge de manœuvre apparaît faible, d'autant plus que des recherches plus poussées seraient nécessaires pour évaluer la portée de ces mesures (sans compter que l'on exclut, bien sûr, le recours aux farines animales ou aux antibiotiques). Une réduction significative de l'émission ne peut être obtenue qu'en baissant le niveau de performance, et il faut savoir que la production de méthane, exprimée par rapport au kg de lait, diminue nettement pour les

niveaux de production laitière élevée. Il n'apparaît donc pas de voie évidente dans ce secteur à moins de diminuer la population animale, ce qui, évidemment, pose d'autres problèmes !

Pour que le tour d'horizon soit complet, il faut également mentionner les recherches en cours à l'INRA de Rennes pour réduire les émissions des bâtiments d'élevage, en particulier par l'utilisation de litière. Mais il est encore trop tôt pour en présenter des résultats, qui devraient compléter ceux obtenus par le CEMAGREF sur le traitement et l'épandage des déjections animales (Martinez *et al.*, 1999), sachant que ce secteur devrait représenter l'équivalent de 0,9 Mt/an de carbone en 2010.

En conclusion

À l'issue de ce très large tour d'horizon, il est possible de revenir brièvement sur les enjeux qui ont été évoqués en introduction, et tout d'abord sur le plan de l'effet de serre.

Au niveau français, une vision d'ensemble peut être obtenue à partir d'un document officiel très récent puisque datant de mars 2002 (troisième communication nationale à la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques, à consulter sur le site Internet de la MIES, *àwww.effet-de-serre.gouv.fr*. Il y est spécifié, après un bref rappel sur le risque d'une diminution des réserves en eau des sols pour la production agricole et forestière et des résultats que nous avons mentionnés concernant les prairies, que la France n'avait pas encore défini de programme spécifique d'adaptation au changement climatique, en dehors des lois sur l'aménagement du territoire et sur la protection de l'environnement. Au niveau des émissions de GES, après mention d'études en cours sur la production d'électricité à partir de la biomasse et de l'expérimentation à échelle industrielle de la production et de la distribution de biocarburants (susceptible d'éviter l'émission de 1 Mt/an de CO_2), il est rappelé que le Plan national de lutte contre le changement climatique (PNLCC) de 1977 ne contenait que peu d'actions volontaristes de maîtrise des émissions dans le secteur agricole, mais décrivait les impacts de certaines évolutions de la Politique agricole commune (PAC) sur ces émissions. À l'heure actuelle, et en dehors des mesures spécifiques au secteur forestier, sont mentionnées la nécessité d'agir sur les déjections animales (susceptibles de conduire à des émissions de l'ordre de 3 Mt/an de CO_2 en 2010), l'orientation vers une limitation des apports d'azote par le biais d'une redevance dans le cadre de la loi sur l'eau en cours d'examen et l'amélioration des connaissances par le biais de la recherche (sur la biomasse, la fermentation entérique des ruminants, les émissions de N_20 par les sols ainsi que le stockage de carbone dans ces mêmes sols). Enfin, l'agriculture serait indirectement concernée par l'objectif de convertir 30 000 ha/an, ramené à 10 000 ha/an, en raison de la tempête de fin 1999, de terres agricoles en forêts.

Au niveau européen, il ne paraît pas exister de dispositif commun, et un élément important, déjà mentionné au niveau français, sera représenté par l'élaboration de la nouvelle PAC en 2003, qui conditionnera notablement les relations de l'agriculture avec son environnement.

La même remarque vaut également, bien sûr, pour les impacts du changement climatique. Cependant, s'il apparaît souhaitable de le prendre en compte dès maintenant au niveau des forêts (d'une part, à cause de leur temps de réponse long mais aussi parce que les travaux des forestiers de l'INRA mettent en évidence une augmentation notable de la productivité, de l'ordre de 30%, sans que l'on sache clairement quelle est la part de l'élévation du gaz carbonique, du réchauffement et de la fertilisation azotée via la pluie), il apparaît encore nécessaire d'approfondir la connaissance sur ce point, d'une part, au niveau des scénarios climatiques et, d'autre part, de l'analyse du passé récent et des évolutions possibles. À ce niveau, l'affichage clair d'une priorité donnée au changement climatique dans les orientations du VIe PCRD (Plan commun de recherche et développement) en cours de mise en place est une bonne garantie de progression à l'échelon européen.

Bernard Seguin est actuellement responsable de la Mission sur le climat et l'effet de serre au sein de l'INRA.

Références bibliographiques

ACADEMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE, 1999. Compte-rendu du colloque « Bilan et gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural ». Paris, 18 et 19 mai 1999. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, n° spécial, 85, 1-392.

ARROUAYS D., PELISSIER P., 1994. Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. *Plant and Soil*, 160, 215-223.

ARROUAYS D. *et al.,* 1999. Stocks de carbone dans les sols de France : quelles estimations ? *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 278-292.

BALESDENT J., 1995. Stockage du carbone dans les sols en fonction de leur utilisation. *In* A. Perrier : *Agriculture et gaz à effet de serre*. Dossier de l'Environnement de l'INRA n° 10, INRA, Paris, 39-48.

BRISSON N. *et al*., 1998. SICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie,* 5-6, 311-346.

CITEPA, 1997 et 1999. *www.citepa.org.*

CASELLA E, SOUSSANA J.F., LOISEAU P., 1996. Long-term effect of CO_2 enrichment and temperature increase on a temperate grassland. I. Productivity and water use. *Plant and Soil*, 182, 83-99.

CASELLA E., SOUSSANA J.F, 1997. Long-term effect of CO enrichment and temperature increase on the carbon balance of a temperate grasssward. *Journal of Experimental Botany*, 48, 1309-1321.

CELLIER P., LAVILLE P., 1999. Les émissions de N_2O par les sols agricoles en France : quelle évaluation possible ? *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 177-192.

CROSSLEY J.F. *et al*., 2000. Uncertainities linked to land processes in climate change simulations. *Climate Dynamic,* 16, 949-961.

DELECOLLE R. *et al*, 1995. *Possible effects of climate change on wheat and maize crops in France. Climate change and agriculture : analysis of potential international impacts*. ASA special publication, Madison, Wisconsin, 59, 241-258.

DELECOLLE R., SOUSSANA J.F., LEGROS J.P., 1999. Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 45-51.

DELECOLLE R., JAYET P.A., SOUSSANA J.F., 2000. *Agriculture française et effet de serre : quelques éléments de réflexion. Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI[e] siècle.* MIES, Paris, 74-80.

DEQUE M., 2000. *Modélisation numérique des changements climatiques. Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI[e] siècle.* MIES, Paris, 22-45.

DOMERGUE M., 2001. *Impact du réchauffement climatique sur le parcours phénologique d'espèces/variétés dans la vallée du Rhône*. Mémoire ESITPA, travail effectué à l'unité CSE de l'INRA d'Avignon, 72 p.

GANICHOT B., 2002. Évolution de la date des vendanges dans les Côtes-du-Rhône méridionales. *C.R. des VI[es] Rencontres rhodaniennes*, Institut Rhodanien, Orange, 38-41.

GERMON J.C. *et al*., 1999. Mécanismes de production, régulation et possibilités de limitation des émissions de N_2O à l'échelle agronomique*. C.R. Acad. Agric. Fr,*. 85, 148-162.

GERMON J.C. *et al*., 1998. Nitrous oxide emission under different soils and land management conditions*. Biol. Fert. Soils*, 26, 199-207.

HENAULT C. *et al*., 1998. Influence of different agricultural practices (type of soils, form of N-fertilizer) on soil nitrous oxide emissions. *Biol. Fert. Soils*, 27, 299-306.

HENAULT C., GERMON. J.C., 1995. Quantification de la dénitrification et des émissions de protoxyde d'azote par les sols. *Agronomie*, 15, 321-355.

IPCC. *Climate change 1995, the science of climate change*. Contribution of Working group 1. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 572 p.

JUIN S., 2001. *Influence du réchauffement climatique sur la répartition géographique et le calendrier de production de trois systèmes fourragers.* Mém. ENSA Montpellier, travail effectué à l'unité CES de l'INRA d'Avignon. 38 p. + ann.

LAVILLE P. *et al*., 1999. Measurement of nitrous oxide fluxes in a fertilised maize crop by micrometeorological and chamber methods. *Agric. For. Meteorol*, 96, 19-38.

LEBON E., 2002. Changements climatiques : quelles conséquences pour la viticulture*. C.R des VI[es] Rencontres Rhodaniennes*, Institut Rhodanien, Orange, 31-36.

MARTINEZ J. *et al*., 1999. Émissions de méthane et de protoxydes d'azote au cours du stockage, du traitement et de l'épandage des déjections animales. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 87-101.

PERRIER A., SAUGIER B. (dir.), 1995. *Écosystèmes et changements globaux*. Dossiers de l'environnement de l'INRA n°8, Paris, 296 pp.

RENAULT P., 1999. Les modèles opérationnels d'émission de N_2O par les sols aux échelles régionales. *C.R. Acad. Agric. Fr.,* 85, 163-176.

ROGER P. *et al.*, 1999. L'émission et la consommation de méthane par les sols : mécanismes, bilan, contrôle. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 193-210.

RUGET F., BETHENOD O., COMBE L., 1996. Repercussions of increased atmospheric CO_2 on maize morphogenesis and growth for various temperature and radiation levels*. Maydica*, 41, 181-191.

SAUVANT D. *et al*., 1999. Production de CH_4 par les ruminants : analyse des processus, quantification et modélisation, spatialisation et bilans, possibilités de réduction des émissions. *C.R. Acad. Agric. Fr.,* 85, 70-86.

SCEES, 1998. *L'agriculture, la forêt et les industries agro-alimentaires*. Collection Graph. Agri. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris, 156 p.

SOUSSANA J.F., 2001. *Changement climatique. Impacts potentiels sur l'agriculture et adaptations possibles*. DEMETER, Armand Colin, Paris, 195-222.

SOUSSANA J.F. *et al*., 2001. Impacts régionaux de changements climatiques sur les prairies et sur la filière viande dans les régions d'élevage peu intensif. *Rapport final du programme REGCLIM*, Ministère de l'Agriculture, Paris.

TEYSSONNEYRE F. *et al*., 2002. Effects of elevated CO_2 and cutting frequency on plant community structure*. New Phytologist*. (sous presse)